

ГЕНЕРАТОРИ КОМПЕНСУВАЛЬНОГО СИГНАЛУ ДЛЯ АЦП СЛІДКУВАЛЬНОГО ТИПУ З ВАГОВОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ, ЩО САМОКАЛІБРУЮТЬСЯ

Проаналізовано можливість побудови генераторів компенсувального сигналу для багаторозрядних АЦП слідкувального типу, що самокалібруються, на базі неточних ЦАП, із ваговою надлишковістю. Показано, що при цьому можливі два підходи з побудовою цифрової частини генератора як на базі виключно двійкової системи числення, так і з додатковим застосуванням вузлів на основі систем числення із ваговою надлишковістю. У рамках запропонованих підходів розглянуто методи структурно-функціональної організації генераторів компенсувального сигналу на базі неточних ЦАП із ваговою надлишковістю.

Вступ

На теперішній час, виробництво і застосування багаторозрядних АЦП слідкувального типу значно скоротилось. Це пояснюється складністю калібрування характеристики перетворення і забезпечення високого рівня точності вказаного типу АЦП зі зміною параметрів навколишнього середовища та старінні аналогової елементної бази.

Водночас застосування вагової надлишковості (ВН) у багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточних елементах, дозволяє дещо спростити їх структуру та підвищувати точність перетворення таких пристроїв [1] шляхом використання спрощеної процедури самокалібрування.

Актуальність

На шляху побудови багаторозрядних двійкових АЦП слідкувального типу виникають певні труднощі. Так, зі зниженням допуску припасування параметрів аналогової елементної бази під час формування компенсувального аналогового сигналу виникають розриви характеристики перетворення АЦП та, як наслідок, зниження точності перетворення.

При цьому використання в АЦП слідкувального типу багаторозрядних двійкових ЦАП для формування компенсувального аналогового сигналу вимагає значних обсягів пам'яті для генерування коригуючих поправок на кожному такті перетворення, що знижує швидкодію. Водночас побудова генератора компенсувального сигналу (ГКМС) на основі ЦАП із ВН дозволяє спростити процедуру генерування відкоригованих значень компенсувального сигналу і значно знижує обсяги пам'яті, потрібні для цього.

Водночас, слід зазначити, що у науково-технічній літературі методи генерування компенсувального сигналу на основі ЦАП із ВН практично не розглянуто. Тому дослідження генераторів компенсувального сигналу для АЦП слідкувального типу з ваговою надлишковістю, що буються, у статті є актуальним.

Метою досліджень є аналіз можливостей створення АЦП слідкувального типу, побудованих на неточних аналогових елементах, зі спрощення процедури самокалібрування, шляхом уведення до його структури генератора компенсувального сигналу на базі ЦАП із ВН.

Постановка задач

1. Проаналізувати існуючі методи структурно-функціональної організації ГКМС для багаторозрядних АЦП слідкувального типу, побудованих на неточних аналогових вузлах.
2. Дослідити запропоновані методи генерування компенсувального аналогового сигналу на базі ЦАП із ВН: а) із застосуванням цифрових еквівалентів компенсувального сигналу; б) із застосуванням межових кодових комбінацій (КК).

3. Оцінити обсяги пам'яті, що необхідні для реалізації ГКМС згідно запропонованих методів.

Розв'язання задач

АЦП слідкувального типу (рис. 1б) відносяться до класу ПФІ компенсаційного типу (рис. 1а) і відрізняються від інших відносно простою структурою та високим темпом видачі результатів, оскільки вихідний код доступний для зчитування на кожному такті перетворення [2]. В таких АЦП вхідний аналоговий сигнал ($A_{ВХ}$) врівноважується компенсувальним аналоговим сигналом ($A_{К}$), що формується ГКМС, увімкненим у коло зворотного зв'язку тракту врівноваження. Причому цифровий еквівалент $K(A_K)$ саме компенсувального сигналу A_K вважається результатом перетворення $A_{ВХ}$

$$N_{ВІХ} = K(A_K) \approx K(A_{ВХ}).$$

Пристрої на рис. 1 містять: СП — схему порівняння, ГКМС — генератор компенсувального сигналу у колі зворотного зв'язку, БК — блок керування, Рв. Лч — реверсивний лічильник, ЦАП — цифроаналоговий перетворювач.

Будуючи ПФІ на неточних аналогових вузлах, під час змінення умов навколишнього середовища, а також у процесі старіння, враховують, що параметри і характеристики аналогових вузлів ЦАП змінюються. При цьому неточними вважаються такі багаторозрядні ЦАП, в яких відхилення параметрів аналогових елементів від їх номінальних значень перевищують кінцеву похибку перетворення. Вказана особливість спричиняє появу стрибків та розривів на характеристиці перетворення ЦАП, що входить до складу ГКМС [1, 3].

Водночас, варто вказати, що в АЦП компенсаційного типу точність та швидкість встановлення компенсувального аналогового сигналу A_K у значній мірі впливають на точність та швидкість роботи АЦП. Основною вимогою до умов генерування A_K у АЦП слідкувального типу є те, що крок змінення A_K під час врівноваження $A_{ВХ}$ не повинен перевищувати значення, що дорівнює сумі кванту молодшого розряду та мінімально припустимої статичної похибки.

При цьому у ПФІ компенсаційного типу, зокрема слідкувального типу, виникає задача такого формування компенсувального сигналу, що не залежить від умов навколишнього середовища, а також старіння [4] і не знижує точності перетворення. Як правило це вирішується шляхом застосування методів самокоригування інструментальних похибок ваг розрядів ЦАП.

Розглянемо підходи щодо розв'язання цієї задачі. Варіанти побудови ГКМС для багаторозрядних АЦП слідкувального типу, виконаних на неточних елементах, наведено на рис. 2.

На рис. 2а зображено структурну схему ГКМС з використанням двійкового лічильника (2-ЛЧ) та двійкового ЦАП (2-ЦАП). В цьому варіанті коригування відхилень ваг розрядів відсутнє, а підвищення точності ЦАП можливе тільки схемотехнічними та технологічними шляхами (покращення елементної бази на етапі виготовлення).

Інший підхід (рис. 2б) передбачає використання коригуючих двійкових ЦАП (Δ -2-ЦАП), дешифратора (ДШ) та запам'ятовуючого пристрою (ЗП), що використовується для збереження кодів $K(Q_i)$ відхилень ваг розрядів основного двійкового ЦАП (2-ЦАП). Аналогові сигнали основний A та коригуючий $\Delta A_{кор}$ з виходів 2-ЦАП та групи Δ -2-ЦАП підсумовуються на аналоговому суматорі та подаються на вихід ГКМС. Недоліком такого підходу є використання коригуючого ЦАП на основі двійкової системи числення. Це пов'язано з тим, що під час змінення параметрів навколишнього середовища та старіння у такому ЦАП виникають розриви та спотворення характеристики перетворення, що зменшують точність компенсації відхилень ваг розрядів

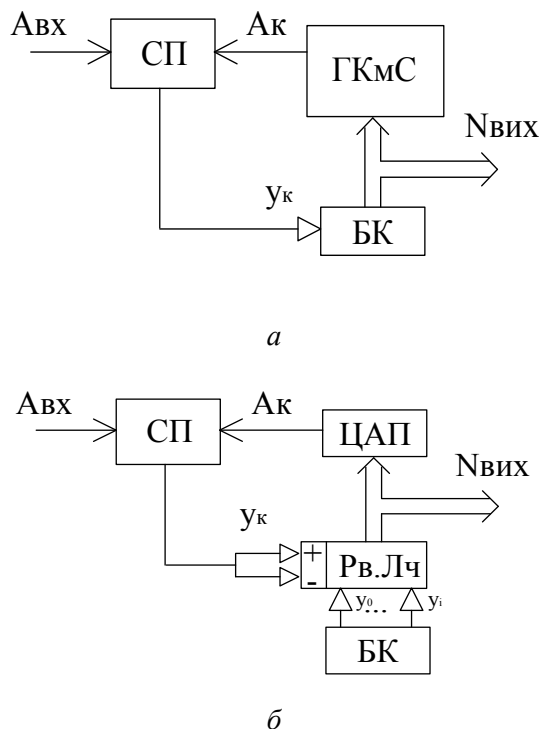


Рис. 1. Структурні схеми АЦП компенсаційного типу:
а — узагальнена; б — слідкувального типу

основного ЦАП та призводять до необхідності використання двох, трьох і більше коригуючих ЦАП меншої розрядності.

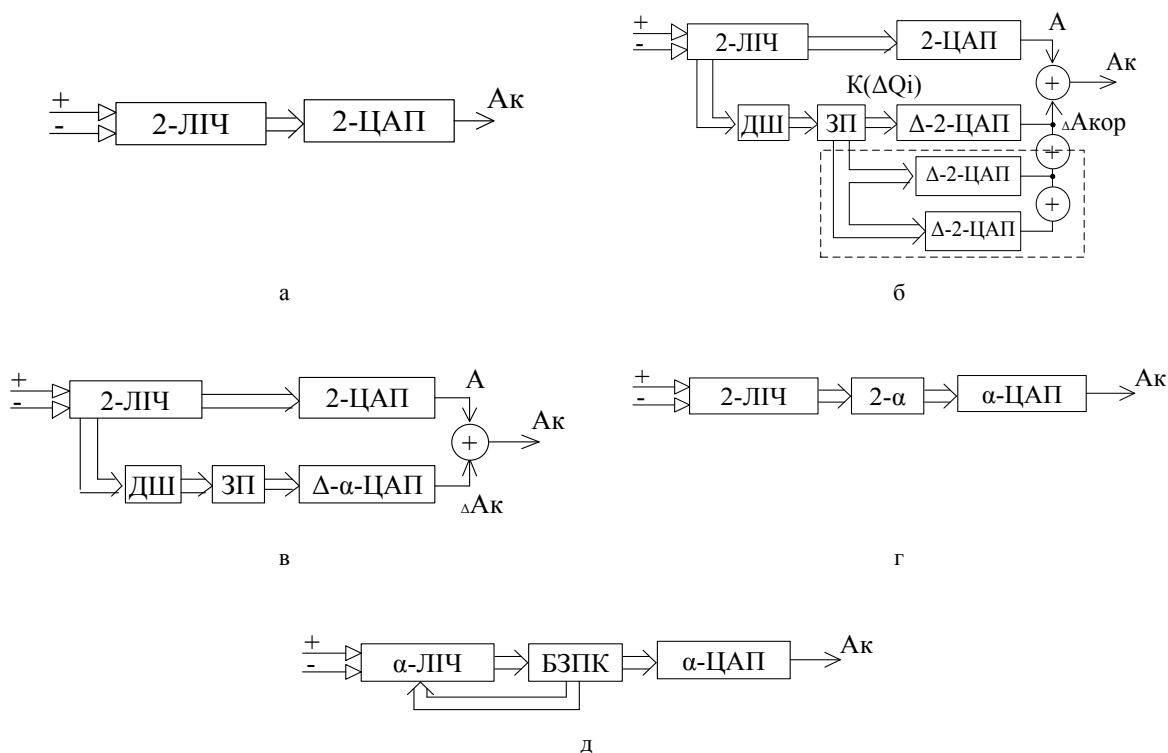


Рис. 2. Структурні схеми ГКМС для АЦП слідкувального типу:

- a* — без коригування похибок ЦАП; *б* — із коригуючими двійковими ЦАП;
- в* — із коригуючим ЦАП на основі СЧВН; *г* — із проміжним перетворенням вхідного двійкового коду в код на базі СЧВН; *д* — із усуненням стрибків характеристики перетворення шляхом застосування межових КК

Використання ЦАП із ВН (Δ - α -ЦАП) у схемі ГКМС (рис. 2в) дозволяє спростити структуру коригуючого ЦАП. Особливістю ЦАП із ВН є нерозривність характеристики перетворення та наявність зон перекриття, що дозволяє не тільки підтримувати заданий рівень похибок перетворення за рахунок використання процедури самокалібрування ваг розрядів виключно в цифровій формі, а й підвищувати точність АЦП, що містять такі ЦАП [1, 3]. Самокалібрування — це один із різновидів самокоригування, що здійснюється з перериванням процесу основного перетворення для визначення цифрових еквівалентів реальних значень ваг розрядів. В основу самокалібрування покладено принцип умовного розбиття розрядної сітки n -розрядного перетворювача на групу m старших «неточних» розрядів і «точних» $n - m$ молодших (рис. 3) [1]. Належність до «точних» молодших розрядів вибирається з умови, що їх абсолютні відхилення не перевищують половини молодшого кванта:

$$\Delta Q_i \leq 0,5 \cdot Q_0,$$

де Q_0 — значення аналогової величини, що відображає вагу молодшого розряду ПФІ.

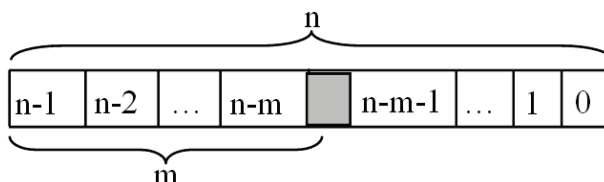


Рис. 3. Модель розрядної сітки АЦП у режимі самокалібрування

Варто зазначити, що знаходження відхилень ваг розрядів основного двійкового ЦАП зображеного на рис. 2б і в передбачає уведення структурної надлишковості у такі ЦАП у вигляді одного додаткового розряду α^* , причому:

$$Q^* = Q_0,$$

де Q_0 — вага молодшого розряду ЦАП; Q^* — вага додаткового розряду α^* [5].

При цьому розрядність АЦП і допуск δQ на параметри елементної бази є визначальними у виборі того чи іншого методу коригування ваг розрядів ЦАП.

Зазначимо, що перспективними підходами щодо генерування компенсуючого сигналу є такі, що базуються на використанні ЦАП із ВН (α -ЦАП) як коригуючого так і основного у схемі ГКМС. Проте варто відмітити, що застосування такого підходу можливе тільки за умови розв'язання задачі побудови генератора кодових комбінацій у системі числення із ВН (СЧВН), що враховував би імовірнісний характер базисів ваг розрядів α -ЦАП на відміну від генераторів кодів на основі жорсткої логіки [6—8] у схемі генерування A_k .

Так, вказана задача може розв'язуватися з використанням у схемах ГКМС лічильника у двійковій системі числення (2-ЛПЧ) та блоку перетворення двійкового коду у код у СЧВН (2- α) (див. рис. 2г) або із використанням лічильника у СЧВН (α -ЛПЧ) та блоку завдання послідовності кодів (БЗПК) (див. рис. 2д).

На рис. 4а, б показано запропоновані схеми, що реалізують методи структурно-функціональної організації ГКМС із використанням α -ЦАП як основного: а) із проміжним перетворенням вхідного двійкового коду в код на базі СЧВН або із застосуванням цифрових еквівалентів A_k ; б) із застосуванням межових КК.

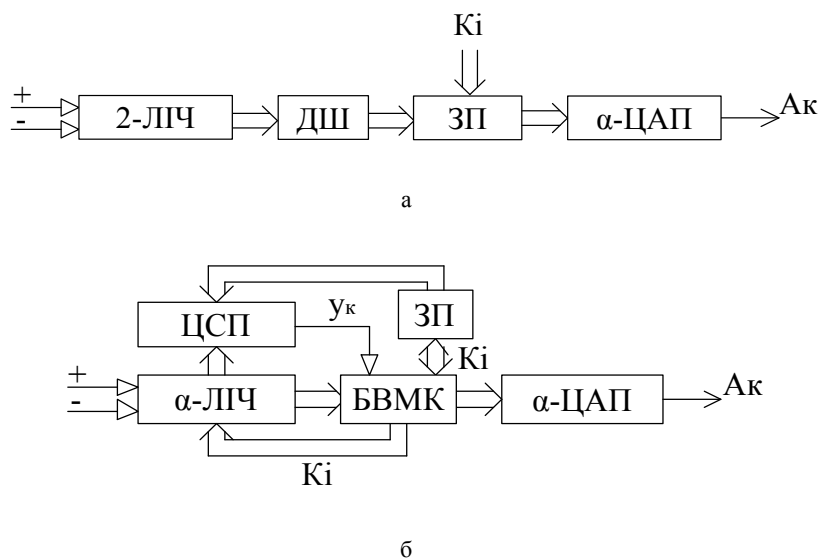


Рис. 4. Структурні схеми ГКМС:

а — із застосуванням цифрових еквівалентів A_k ; б — із застосуванням межових КК

Генерування A_k пристроєм, в якому застосовується перший метод структурно-функціональної організації ГКМС умовно можна розділити на декілька етапів. Першим етапом є самокалібрування ваг розрядів ЦАП із ВН, що входить до складу АЦП із перериванням процедури основного перетворення.

Самокалібрування полягає у визначенні відхилень ваг старших «неточних» розрядів шляхом порівняння ваги поточного розряду, що калібрується, з сумою ваг певної групи сусідніх молодших розрядів ЦАП на базі існуючих між ними математичних співвідношень. У подальшому, при цьому, здійснюється обчислення коригувальних поправок або коригованих значень «неточних» розрядів [3]. Результатом виконання процедури самокалібрування, блок-схему алгоритму якої показано на рис. 5, є збережені у пам'яті цифрові еквіваленти реальних ваг розрядів ЦАП.

Для генерування A_k в АЦП слідкувального типу із ВН, згідно з методом генерування компенсуючого аналогового сигналу із застосуванням цифрових еквівалентів компенсуючого сигналу авторами пропонується використовувати таблицю перетворення $K_{BX} \rightarrow N_p$. Вказана таблиця являє собою сукупність пар кодових слів у двійковій системі числення (K_{BX}) та відповідних їм КК у системі числення із ВН (N_p). Для складання вказаної таблиці використовується лічильник у двійковій системі числення та перетворювач «цифровий еквівалент—робочий код» [9].

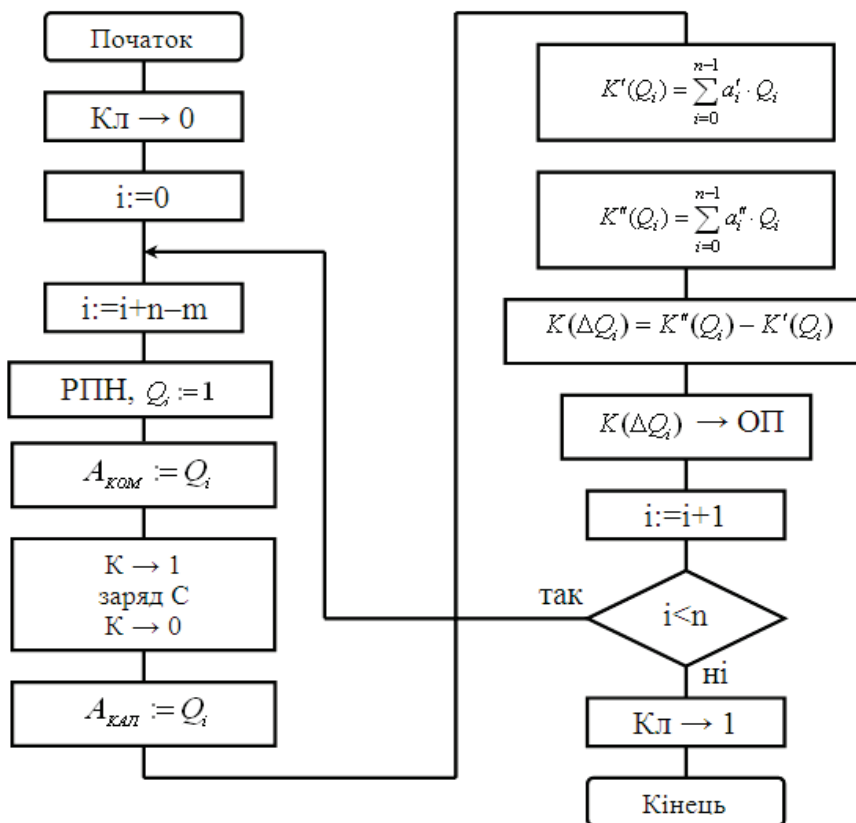


Рис. 5. Блок-схема алгоритму самокалібрування

Для пояснення суті таблиці перетворення $K_{ВХ} \rightarrow N_P$ розглянемо узагальнену операторну схему АЦ-перетворення з ваговою надлишковістю, що може бути представлена таким чином:

$$A_{ВХ} \rightarrow A_K \rightarrow N_P \rightarrow K_{ВІВХ}(A_K),$$

де $A_{ВХ}$ — це вхідний аналоговий сигнал; A_K — компенсувальний аналоговий сигнал, причому $A_K = \sum_0^{n_\alpha-1} a_i Q_i$; $N_P \in \{a_{n_\alpha-1}, \dots, a_1, a_0\}$ — робочий код; $K_{ВІВХ}(A_K)$ — цифровий еквівалент компенсувального аналогового сигналу, що визначається як

Таблиця 1

Таблиця перетворення $K_{ВХ} \rightarrow N_P$

i	$K_{ВХi}$	N_{Pi}
0	00000000	00000000000
1	00000001	00000000001
2	00000010	00000000010
3	00000011	00000000100
4	00000100	00000000101
5	00000101	00000001000
6	00000110	00000001010
...

$$K_{ВІВХ} = \sum_0^{n_\alpha-1} a_i K(Q_i), \tag{1}$$

де $K(Q_i)$ — цифровий еквівалент двійкового коду реальної ваги i -го розряду ПФІ.

Блок-схему алгоритму формування таблиці перетворення $K_{ВХ} \rightarrow N_P$ наведено на рис. 6. Приклад вказаної таблиці для 11-ти розрядного АЦП слідкувального типу на основі СЧВН із основою системи числення $\alpha = 1,618$ наведено у табл. 1.

Для реалізації генерування компенсувального сигналу згідно описаного методу структурна схема ГКМС повинна містити такі блоки: ЦАП із ВН; реверсивний двійковий лічильник (2-ЛІЧ); запам'ятовуючий пристрій (ЗП) для зберігання таб-

лиці перетворення $K_{BX} \rightarrow N_p$; ДШ — дешифратор для адресації по комірках ЗП. Структурну схему ГКМС, що використовує вищеописаний метод, наведено на рис. 4а.

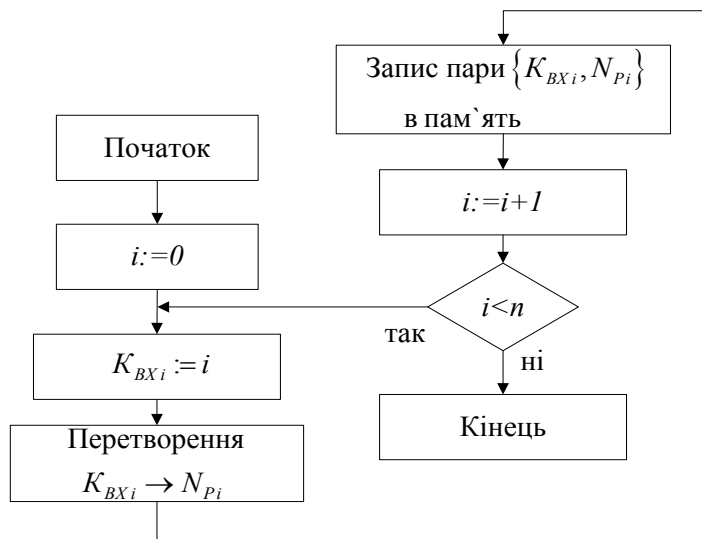


Рис. 6. Блок-схема алгоритму формування таблиці перетворення $K_{BX} \rightarrow N_p$

Іншим методом генерування компенсувального аналогового сигналу на базі ЦАП із ВН є такий, що базується на використанні межових КК. Причому, межові кодові комбінації — це такі сусідні коди N'_i та N''_i , аналогові еквіваленти яких відрізняються не більше ніж на значення одного молодшого кванту ПФІ. Наявність вказаних кодів пояснюється властивістю багатозначності зображення величин у СЧВН [1, 10].

Для межових КК виконується така умова:

$$A_i'' \leq A_i' + Q_0,$$

де Q_0 — вага молодшого розряду; A_i'' — аналоговий еквівалент коду N''_i , причому $A_i'' = \sum a_i \cdot Q_i$, де a_i — розрядні коефіцієнти коду N''_i , Q_i — ваги розрядів ПФІ; A_i' — аналоговий еквівалент коду N'_i , причому $A_i' = \sum a_i \cdot Q_i$, де a_i — розрядні коефіцієнти коду N'_i .

При цьому, згідно з запропонованим методом генерування компенсувального аналогового сигналу із застосуванням межових КК, правило лічби (зміни КК у регістрі лічильного пристрою) у ПФІ задається таким виразом:

$$N_{i+1} = \begin{cases} N'_i, & \text{якщо } N_i := N''_i; \\ N''_i, & \text{якщо } N_i := N'_i. \end{cases}$$

де N_i та N_{i+1} — поточний та наступний код у регістрі лічильного пристрою АЦП слідкувального типу із ВН.

Межові комбінації шукаються тільки для групи «неточних» розрядів. При цьому пошук межової КК для кожного «неточного» i -го розряду здійснюється з використанням алгоритму порозрядного наближення [1], на основі врівноваження допоміжних аналогових сигналів $A_{\text{кал } i}$ та $A_{\text{кал } i} + Q_0$ без вмикання і з вмиканням i -го розряду та з використанням рекурентних співвідношень між вагами розрядів $Q_i = Q_{i-1} + Q_{i-2} + \dots + Q_{i-p-1}$ [1, 3, 10].

Так в результаті такої процедури для кожного «неточного» i -го розряду отримуються межові комбінації такого вигляду (табл. 2).

Межові кодові комбінації

Q_i	128,86	75,00	46,78	29,60	17,50	10,50	6,98	4,00	2,71	1,64	1,00	A_i	ΔA_i
N_i'	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	29,60	0,6
N_i''	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	29,00	

Тут N_i' та N_i'' коди, що задають межову КК і аналогові еквіваленти яких дорівнюють A_i'' та A_i' відповідно. Блок схему алгоритму пошуку межових КК зображено на рис. 7.

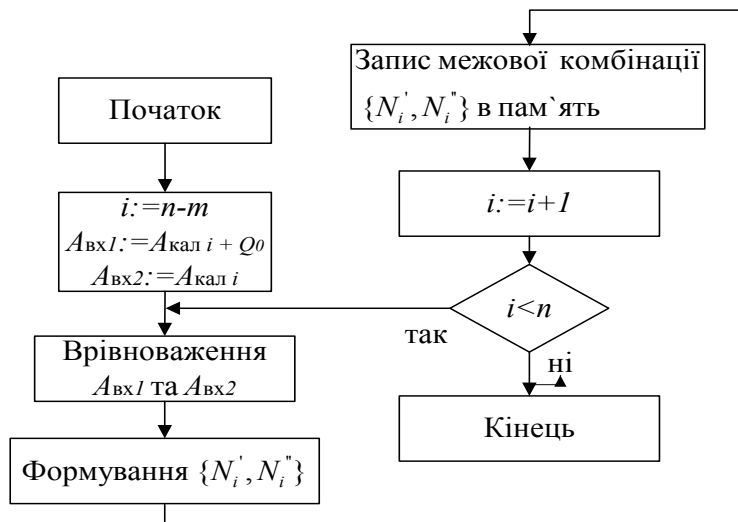


Рис. 7. Блок схема алгоритму пошуку межових КК

Приклад таблиці межових КК для 11-ти розрядного АЦП слідкувального типу на основі СЧВН із основою системи числення $\alpha = 1,618$ та допуском на аналогову елементну базу на рівні $\delta Q = 10\%$ наведено у табл. 3. Варто відзначити, що для вказаного варіанту АЦП точні і неточні розряди треба поділити таким чином, що $n = 11, m = 7$.

Проаналізувавши викладене, визначимо набір вузлів, що повинна містити структурна схема ГКМС (рис. 4б), в якій використовується запропонований метод генерування A_k . Це такі вузли: ЦАП із ВН; реверсивний лічильник у СЧВН (α -ЛПЧ); запам'ятовуючий пристрій (ЗП) для зберігання межових КК; цифрова схема порівняння (ЦСП) — для порівняння поточної КК та межових КК; блок вибору послідовності межових КК (БВМК) — для керування процесом вибірки межових КК.

Оцінимо обсяги пам'яті, необхідні для реалізації ГКМС, згідно із запропонованими методами.

При цьому для ГКМС із застосуванням цифрових еквівалентів компенсувального сигналу знадобиться ЗП такого обсягу:

$$V = V(K_{ВХ}) + V(N_P) = n \cdot 2^n + n \cdot \gamma_n \cdot 2^n = n \cdot 2^n + n \frac{\ln 2}{\ln \alpha} \cdot 2^n = n \cdot 2^n \left(1 + \frac{\ln 2}{\ln \alpha} \right) \text{ комірков.}$$

Для зберігання КК у ГКМС із застосуванням межових КК знадобиться ЗП такого обсягу: $V = 2n \cdot \gamma_n \cdot (n - m) = 2n \cdot \frac{\ln 2}{\ln \alpha} (n - m)$ комірков.

Розглянуті схеми ГКМС використовуються у разі реалізації АЦП слідкувального типу з ВН, що самокалібруються, із застосуванням неточних елементів. На рис. 8 показано структурну схему

Таблиця 3

Таблиця межових КК

i	N_i'	N_i''
0	00000010001	000000011xx
1	00000100000	00000011xxx
2	00001000001	0000011xxxx
3	00010000000	000011xxxxx
4	00100000000	00011xxxxxx
5	01000000001	0011xxxxxxx
6	10000000001	011xxxxxxx

такого АЦП, що використовує ГКМС із застосуванням межових КК. Тут АК — аналоговий комутатор, ГКЛС — генератор калібрувального сигналу, БПП та БОП блоки постійної та оперативної пам'яті, ЦОП — цифровий обчислювальний пристрій, РПН — регістр послідовного наближення, ЛПЧ — лічильник.

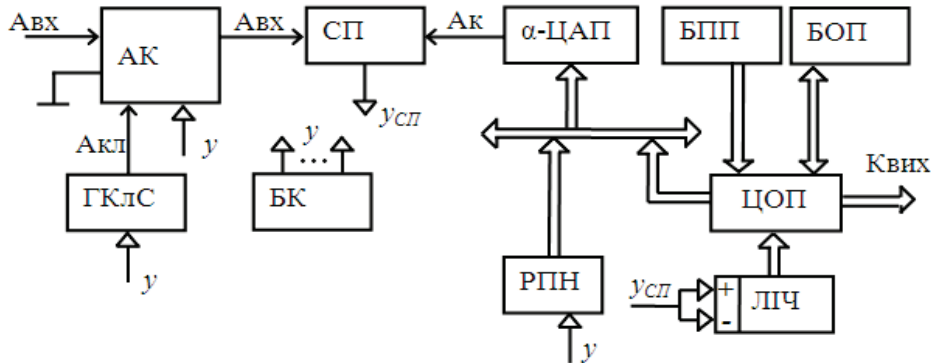


Рис. 8. Структурна схема АЦП слідкувального типу з ВН, що застосовує метод межових КК

Висновки

1. Проаналізовано можливість побудови ГКМС для багаторозрядних АЦП слідкувального типу, що самокалібруються, на базі неточних ЦАП із ВН. Показано, що при цьому можливі два підходи: з побудовою цифрової частини як на базі виключно двійкової системи числення, так і з додатковим застосуванням вузлів на основі СЧВН.

2. У рамках запропонованих підходів розглянуто два методи структурно-функціональної організації ГКМС на базі неточних ЦАП із ВН: а) із застосуванням цифрових еквівалентів компенсуючого сигналу; б) із застосуванням межових КК. Показано, що останній підхід дозволяє зменшити обсяг пам'яті потрібної для реалізації ГКМС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Азаров О. Д. Аналого-цифрове порозрядне перетворення на основі надлишкових систем числення з ваговою надлишковістю: моног. / О. Д. Азаров. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. — 232 с.
2. Уолт Кестер. Аналого-цифрове преобразование / Уолт Кестер; пер. с англ. Володина Е. Б. — М.: Техносфера, 2007. — 1019.
3. Азаров О. Д. Багаторозрядні АЦП і ЦАП із ваговою надлишковістю, стійкі до параметричних відмов: моног. / О. Д. Азаров, О. В. Кадук. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2010. — 150 с.
4. Азаров О. Д. Високолінійні порозрядні АЦП з ваговою надлишковістю: моног. / О. Д. Азаров, О. А. Архипчук, С. М. Захарченко. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 125 с.
5. Микроэлектронные цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи информации / под ред. В. Б. Смолова. — Л.: Энергия, 1976. — 336 с.
6. А. с. 1439751 СССР, Н03 М 13/12. Преобразователь двоичного кода в код Фибоначчи / А. П. Стахов, В. А. Лужецкий, П. В. Козлюк, И. М. Попович (СССР). — № 4076283/24-24; заявл. 09.06.86; опубл. 23.11.88, Бюл. № 43.
7. А. с. 662932 СССР, G 06 F 5/00. Преобразователь r-кода Фибоначчи в двоичный код / А. П. Стахов, Н. А. Соляниченко (СССР). — № 2386002/18—24; заявл. 02.08.76; опубл. 15.05.79, Бюл. № 18.
8. А. с. 662933 СССР, G 06 F 5/00. Преобразователь кодов / А. П. Стахов, Н. А. Соляниченко (СССР). — № 2386002/18—24; заявл. 02.08.76; опубл. 15.05.79, Бюл. № 18.
9. Азаров О. Д. Прямое та зворотнє перетворення «робочий код — цифровий еквівалент» в АЦП і ЦАП, що самокалібруються, з ваговою надлишковістю / О. Д. Азаров, О. В. Кадук, О. В. Дудник, О. Г. Муращенко // Проблеми інформатизації та управління. — 2010. — № 2. — С. 6—13.
10. Стахов А. П. Коды золотой пропорции / А. П. Стахов. — М.: Радио и связь, 1984. — 152 с.

Рекомендована кафедрою обчислювальної техніки

Стаття надійшла до редакції 29.09.11
Рекомендована до друку 19.10.11

Азаров Олексій Дмитрович — завідувач кафедри, **Дудник Олександр Вікторович** — аспірант.
Кафедра обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця